

論文 高粘性の CFT 構造用高強度充填コンクリートを対象としたポンプ圧送性の評価

全 振煥^{*1}・依田 和久^{*2}・閑田 徹志^{*3}・浅岡 茂^{*4}

要旨：高強度充填コンクリートは、一般的に粘性が高くポンプ圧送性が懸念されるが、圧入施工計画に必要なポンプ圧送時の圧力損失値が十分把握されていない。本研究では、 $Fc80N/mm^2$ 以上の高強度充填コンクリートにおいて、見掛の塑性粘度によりポンプ圧送時の圧力損失を推定する評価手法を提案するとともに、ポンプ圧送実験で圧力損失を測定し、実工事に適用した。その結果、実工事において高強度充填コンクリートの CFT 圧入施工が可能であることを示し、従来のデータに新たなデータや知見を加えてポンプ圧送性を評価することにより、今後同種の工事にて圧入施工計画を合理的に立案する見通しを得た。

キーワード：CFT 造、高強度コンクリート、見掛の塑性粘度、ポンプ圧送性、圧力損失

1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (CFT) 造は、許容耐力を鋼管とコンクリートの累加強度とすることができるため、鋼材量低減によるコストダウン¹⁾を図る上でコンクリートの高強度化に関するニーズが高い。そこで、設計基準強度 (以下 Fc) $70\sim 120N/mm^2$ の高強度充填コンクリートを開発し²⁾、適用を進めている。特に、この強度範囲の中で $Fc80N/mm^2$ 領域のコンクリートは、シリカフェームセメントに代え、中庸熟セメントを用いることによりコスト低減が図れるが、この高強度コンクリートは粘性が高いため、ポンプ圧送性が懸念される。しかし、CFT 造の圧入施工計画に必要なポンプ圧送時の圧力損失値がほとんど把握されていない。また、高強度コンクリートの圧力損失値を推定する方法として回転粘度計による見掛の塑性粘度³⁾や L 型フロー試験による L フロー初速度⁴⁾があるが、本研究で対象としている中庸熟セメントを用いた $Fc80N/mm^2$ 以上の高粘性の高強度充填コンクリートについては検討が行われていない。

本研究では、実機粘性実験においてスランブフローや見掛の塑性粘度について経時保持性を含めた性状を把握する。さらにポンプ圧送実験及び実施工において見掛の塑性粘度と圧力損失の測定を行い、従来データに今回のデータや知見を加えて、新たな圧力損失の推定式を提案する。これにより中庸熟セメントを用いた $Fc80N/mm^2$ 以上の高粘性の高強度充填コンクリートの CFT 造圧入施工計画の立案に寄与するとともに、高さ 80m 以上の実工事に適用することを目指す。

2. CFT 構造用充填コンクリートの施工性

2.1 充填コンクリートの要求性能

CFT 造のコンクリートの充填方法のうち、圧入方式は 1 回の打設高さが大きくとれることやダイアフラム近傍への充填性が確保しやすい。また、コンクリートの打設始めから計画充填高さまで連続的に打設するため、充填終了までの流動性保持が要求される。この圧入方式に要求されるコンクリートの性能としては、フレッシュ時の流動保持性、充填性、材料分離抵抗性などが挙げられるが、フレッシュ時の性状は経過時間に伴い流動性の低下や粘性の上昇などによりポンプ圧送性に大きく影響を与えるため、経過時間による粘性などの性状変化の把握が重要となる。

2.2 見掛の塑性粘度による圧力損失の推定

(1) 見掛の塑性粘度の概念

コンクリートのポンプ圧送にあたっては、ポンプ圧送時の配管内の圧力損失を明らかにし、圧送負荷を予測することが重要となる。高強度コンクリートは、使用材料や割合によりコンクリートの粘性が大きく異なり、圧力損失に大きな影響を及ぼす。コンクリートの粘性は、回転粘度計を用いた見掛の塑性粘度の測定により評価することができる。回転粘度計と測定原理を図-1 に示す。回転粘度計は、羽根が付いた棒を回転させ、軸に作用するトルク値と回転数を測定し、これらの関係から見掛けの塑性粘度の算出ができる。著者らは、この見掛の塑性粘度と圧力損失の間に線形の相関関係があることを見出し、実績に基づく推定式によりコンクリートのポンプ圧送に必要な圧力損失を推定し、圧送負荷の有効な算定手法として利用している。

*1 鹿島技術研究所 建築生産グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D (正会員)

*4 鹿島建設 東京建築支店 品質監理部 構造グループ 次長 (正会員)

(2) 圧力損失の評価

Fc60N/mm²以下のコンクリートを対象とし、圧送管125A（以下5B）を使用した場合の実吐出量30m³/hにおける見掛の塑性粘度による既往の圧力損失推定式³⁾を図-2に示す。この式を用いることで、高強度コンクリートにおいて圧送実験を行うことなく見掛の塑性粘度試験のみで使用材料や調合の影響を反映したポンプの圧送負荷の予測ができる。しかしながら、この式ではFc60N/mm²以下のコンクリートが対象となっている。最近ではFc60N/mm²よりも高い強度に移行しつつあり、中心はシリカフェームセメントを使用したものであるが、コストに課題がある。これに対し中庸熱セメントコンクリートを用いる場合、シリカフェームセメントコンクリートに比べコスト低減が可能となるが、図-3に示す通り、高い粘度に代表される施工性に課題がある。特にポンプの圧力損失を評価することが重要となる。

3. 実機粘性確認及びポンプ圧送実験

3.1 実験概要

実適用に向けFc60N/mm²を超えるCFT構造用充填コンクリートのポンプ圧送性を評価するため、二つの実験を実施した。第1には実機粘性確認実験として実機練りにおける時間経過に伴うコンクリート性状の変化を把握した。第2にはポンプ圧送実験として、コンクリート種類の違いがポンプ圧送性に与える影響を確認するために水平管にて圧力損失を把握した。その実験計画を表-1に示す。コンクリートはFc80N/mm²の中庸熱セメントを用いたコンクリート3種類と、比較用としてシリカフェームセメントを用いたFc80N/mm²と100N/mm²のコンクリート2種類の計5種類を生コン工場4社で製造したものととした。実機粘性確認実験では、コンクリートの運搬や待ち時間、打設時間を考慮し、出荷から180分までの経過時間による各種フレッシュ性状と見掛の塑性粘度の変化を測定した。ポンプ圧送実験では、水平管の延べ長さ190mとし、各調合を計画圧送速度（吐出量）10、20、30、40、50m³/hと変化させながら圧送配管に取り付けた圧力計により圧力を計測した。また、ポンプ圧送前後のフレッシュ性状を確認した。

3.2 使用材料と調合

実機粘性確認実験とポンプ圧送実験の使用材料を表

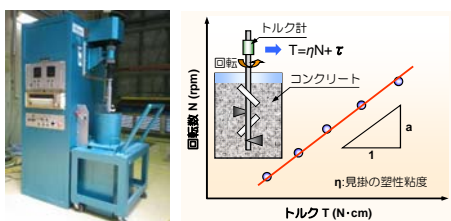


図-1 回転粘度計装置と測定原理

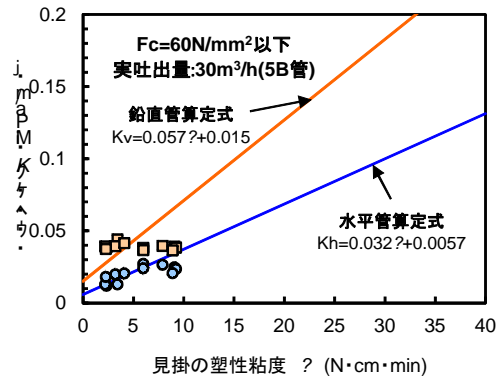


図-2 見掛の塑性粘度による既往の圧力損失推定式

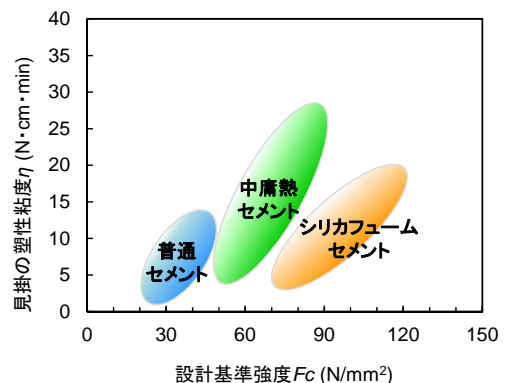


図-3 設計基準強度と見掛の塑性粘度の概念図

表-1 実験計画

要因	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
セメント種類	シリカフェーム(SF)		中庸熱(M)		
設計基準強度 Fc(N/mm ²)	100	80	80		
生コン工場	H社	R社	R社	A社	S社

表-2 使用材料

材料	種類	物性	生コン工場			
			H社	R社	A社	S社
セメント	シリカフェーム	密度(g/cm ³)	3.08		-	
	中庸熱	密度(g/cm ³)	-	3.21		
細骨材	山砂/砕砂	表乾密度(g/cm ³)	2.59/-	2.60/-	2.58/2.62	2.60/2.66
	山砂/砕砂	粗粒率	2.62/-	2.65/-	2.20/3.40	2.10/3.40
粗骨材	碎石	表乾密度(g/cm ³)	2.67	2.67	2.70	2.70
		実積率	60.0	61.0	60.0	60.0
混和剤	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)					

表-3 コンクリートの調合

記号	セメント種類	Fc	生コン工場	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
							水	セメント	山砂	砕砂	粗骨材	混和剤
SF100-H	SF	100	H社	1.5	19.1	46.0	150	785	694	-	842	14.13
SF80-R	SF	80	R社	2.0	23.3	41.9	140	601	702	-	1001	9.62
M80-R	M	80	R社	2.0	24.1	42.5	170	706	652	-	906	10.94
M80-A	M	80	A社	2.0	25.1	45.9	170	678	358	358	875	10.85
M80-S	M	80	S社	2.0	21.9	44.1	165	753	400	271	875	13.55

ー2 に、コンクリートの調合を表-3 に示す。コンクリート種類は前記の5種類とした。なお、実機粘性確認実験は、シリカフェームセメントを用いた Fc100N/mm² のコンクリート (SF-100H) を除いて実施した。

3.3 試験項目と方法

各種試験項目と方法を表-4 に示す。実機粘性確認実験では、出荷時から180分まで30分ごとに各調合のレミコン車から試料を採取し、各種フレッシュ試験を実施した。ポンプ圧送実験では、出荷時と荷卸時及び圧送後の筒先から試料を採取し、表-4 に示す全ての試験項目について実施した。なお、二つの実験ともスランプフロー試験時に50cm到達時間と停止時間に加え、回転粘度計を用いた見掛の塑性粘度の測定を行った。圧縮強度は、ポンプ圧送実験時に荷卸時及び圧送後の筒先から試料を採取し、φ100×200mmの供試体を作製して標準養生を行い、材齢1, 4, 13週にて測定を行った。

3.4 ポンプ圧送実験のポンプ車及び配管計画

コンクリートポンプ車 (最大油圧36MPa) は、標準圧にて理論最大吐出圧が15MPa、理論最大吐出量が68m³/hのタイプを使用した。配管計画を図-4 に示す。配管は5B管を用い、直管延長長さ193m、バント管7箇所、フレキシブルホース3mとした。圧力計はフラッシュダイヤフラム型圧力計 (PWF-PA) を使用し、同社製の動ひずみ計 (DRA-107A) を介して計測を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 実機粘性確認実験

実機粘性確認実験で得られたデータをもとに、スランプフローの経時変化を図-5 に示す。SF80-R以外の全ての調合においてスランプフローは経過時間により徐々に90分まで増加し、その以降から低下する傾向が見られたが、荷卸し後180分まで管理値の65.0±7.5cmの範囲を満足した。見掛の塑性粘度の経時変化を図-6 に示す。各調合の見掛の塑性粘度は経過時間に関わらず変化が小さい傾向であったが、M80-Sについては他の調合に比べ単位セメント量が多く、水セメント比が低いため経過時間90分から大きく増加し、経過時間120分以降は測定不能であった。この結果は図-5 のスランプフローの傾向と異なり、ポンプ圧送性はスランプフローではなく、見掛の塑性粘度で評価する必要があることを示唆している。



図-4 配管計画

また、中庸熱セメントを用いたコンクリート (M80-R) は、シリカフェームセメントの同じ Fc の SF80-R に比べ見掛の塑性粘度は2倍以上を示し、非常に高い粘性を有することが定量的に明らかとなった。以上の結果から、使用材料や調合及び経過時間によるコンクリート性状や塑性粘度の違いが確認でき、それらがポンプ圧送性に及ぼす影響を把握するため、水平管によるポンプ圧送実験を実施した。

表-4 試験項目と方法

区分	試験項目	試験方法	管理値	粘性試験	ポンプ圧送実験		
					出荷	荷卸	筒先
フレッシュ	スランプフロー(cm)	JIS A 1150	65.0±7.5	○	○	○	○
	空気量(%)	JIS A 1128	2.0±1.5	○	○	○	○
	コンクリート温度(°C)	JIS A 1156	5~35	○	○	○	○
	見掛の塑性粘度(N・cm・min)	回転粘度計	-	○	-	○	○
硬化	圧縮強度(N/mm ²)	JIS A 1108	Fc 以上	-	-	○	○

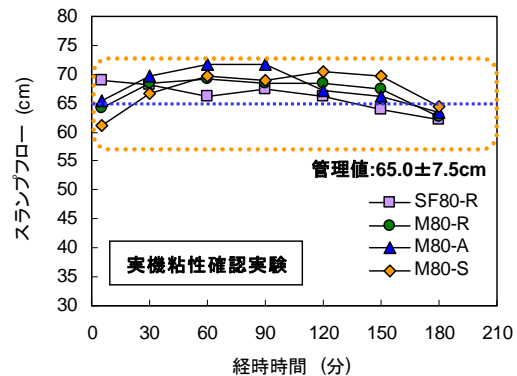


図-5 スランプフローの経時変化

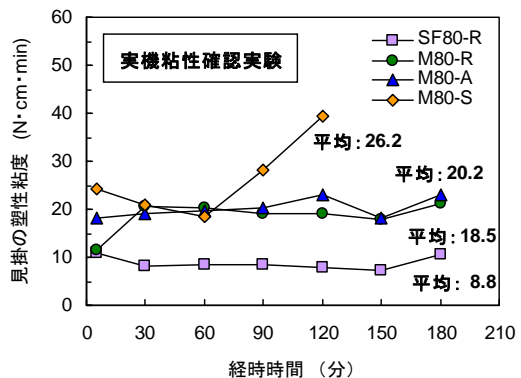


図-6 見掛の塑性粘度の経時変化

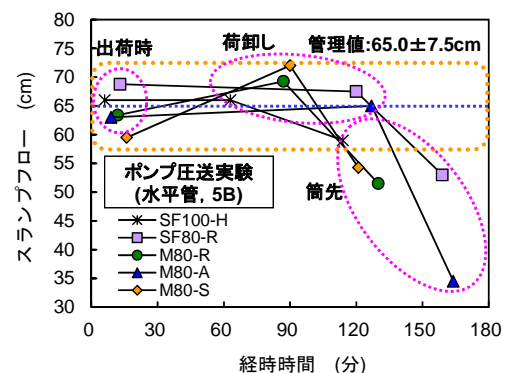


図-7 スランプフローの経時変化

4.2 ポンプ圧送実験

スランブフローの経時変化を図-7に示す。スランブフローは荷卸時に全ての調査が管理値の $65.0 \pm 7.5 \text{cm}$ を満足したが、圧送後の筒先では各調査にて 15cm 以上大きく低下する傾向を示した。ポンプ圧送前後の見掛の塑性粘度の比較を図-8に示す。圧送前後の見掛の塑性粘度は、全ての調査において圧送後が圧送前に比べ若干低下する傾向を示した。この結果から圧送前のコンクリートにより見掛の塑性粘度を測定して圧力損失を予測することとした。各調査における見掛の塑性粘度と圧力損失の関係を図-9に示す。圧力損失は、P3とP5の管内圧力の差をその距離 125m で除して求めた。見掛の塑性粘度が増加することに伴い、圧力損失が上昇する傾向が見られた。ポンプ圧送時の実吐出量と実吐出圧の関係を図-10に示す。実吐出量は、理論吐出量と容積効率の積とし、容積効率は、コンクリートの容積をピストンの容積とストローク数の積の値で除したものとした。図中の数字は荷卸時における見掛の塑性粘度を表す。この図より見掛の塑性粘度がポンプ圧送性に大きく影響を与えている。本実験で用いたポンプ車は国内最大吐出圧の能力を有するものであり、この最大実吐出圧 15MPa で実用的な圧送量 $30 \text{m}^3/\text{h}$ 以上を確保しようとするで見掛の塑性粘度の上限値を $25.0 (\text{N} \cdot \text{cm} \cdot \text{min})$ とする必要がある。

ポンプ圧送前後の圧縮強度の比較を図-11に示す。各調査における圧送後の圧縮強度は、圧送前に比べ若干低下する傾向であったが、全ての調査が $100 \text{N}/\text{mm}^2$ を上回り、目標強度 $90 \text{N}/\text{mm}^2$ を満足した。

以上の結果から、 $\text{Fc}80 \text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリートでは見掛の塑性粘度が最も低い M80-R を実工事に採用した。

5. 施工事例

5.1 実験概要

実際の $\text{Fc}80 \text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリートを使用する CFT 造圧入施工計画を立案するに寄与することを目的に、配管種類や延べ長さ、テーパ管の使用などの配管計画の要素が圧力損失に与える影響を調べた。実適用建物の圧入計画概要を図-12に示す。実適用建物の N 工事は内ダ

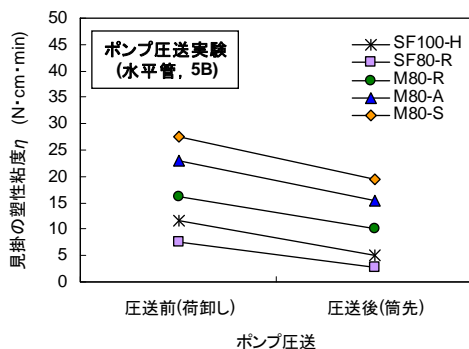


図-8 ポンプ圧送前後の見掛の塑性粘度の比較

イアフラム式で、中庸熱セメントを用いたコンクリートを地上 1F から 20F (高さ 86m) まで 3 節に分けて圧入打設する計画とし、1 節 (1F~9F: 高さ 36.0m) では見掛

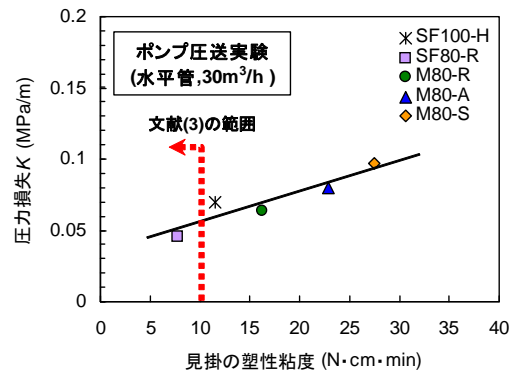


図-9 見掛の塑性粘度と圧力損失の関係

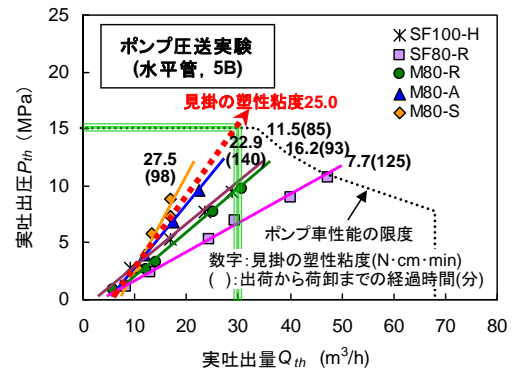


図-10 実吐出量と実吐出圧の関係

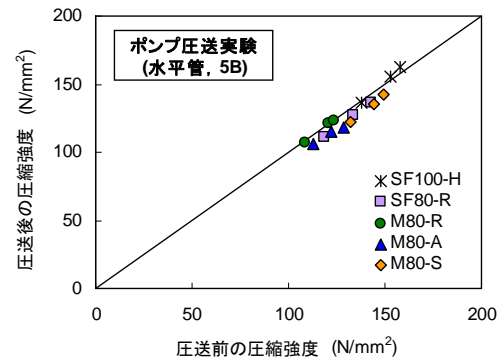


図-11 圧送前後の圧縮強度の比較

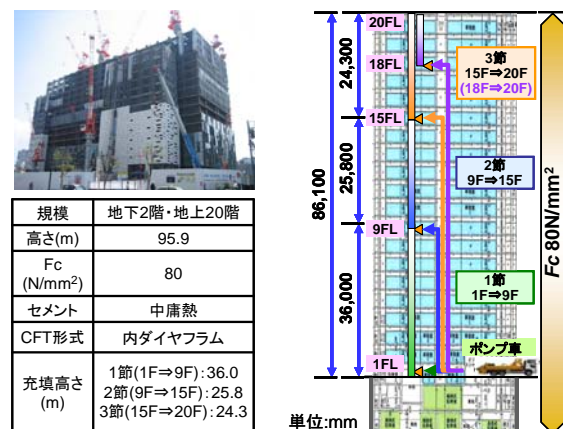


図-12 実適用建物の圧入計画の概要

の塑性粘度確認を、2節(9F~15F:高さ25.8m)と3節(15F~20F:高さ24.3m)では圧送前後の見掛の塑性粘度の把握に加え、圧入施工時の圧力損失を測定した。輸送管は、充填コンクリートの粘性が高いことを考慮し鉛直管全てを125A管(5B)とした。また、圧入階の水平管については配管直径の違いによる圧力損失への影響を把握するため、2節では配管の一部にテーパ管(変更管:5B⇒4B)を用いて100A管(4B)に変更し、3節では圧送距離が2節より高いことから全てを125A管とした。なお、各種フレッシュ試験は表-5に示す試験項目について実施した。各種試験におけるコンクリート試料は荷卸時及び圧送後とし、圧送後の試料は充填終了後のCFT鋼管柱天端から採取した。

5.2 実験結果

(1) スランプフローと見掛の塑性粘度

コンクリートの試料採取地点別スランプフローを図-13に示す。荷卸時のスランプフローは、全ての調合が管理値65.0±7.5cmの範囲を満足したが、圧送後のスランプフローは荷卸時よりロスが15~35cm程度大きく低下する傾向であった。試料採取地点別見掛の塑性粘度を図-14に示す。見掛の塑性粘度は、同じ調合のコンクリートであっても若干変動する傾向であったが、前記の上限値である25.0(N・cm・min)を全て下回る結果であった。また、圧送後の見掛の塑性粘度は、荷卸時に比べ低下する傾向を示した。

(2) ポンプ圧送時の圧力損失

N工事における圧送距離ごとの2節と3節の管内圧力の測定結果の一例を図-15に示す。管内圧力は2節と3節とも実吐出量が多くなると管内圧力が増加する傾向を示した。2節の管内圧力では、テーパ管の部位で圧力が急減し、圧力損失が大きいことを示している。その影響で、テーパ管よりポンプ車に近い領域では全体に管内圧力が高くなっている、そのためこのテーパ管の継手部が許容耐圧(4MPa)の水準近くまで上昇した。テーパ管を使用せず全て125A(5B)管を用いた3節の管内圧力は2節より鉛直管の高さが2倍程度高く圧入階の水平管も長いにも関わらず、同じ実吐出量にて2節よりやや低くなる事が確認できた。その結果より、中庸熱セメントを用いたF_c80N/mm²以上のコンクリートでは、粘性が高いためテーパ管を使用せず、全ての輸送管を125A(5B)管で使用するなど詳細に検討した圧送施工計画の立案が必要であることがわかった。

(3) 圧力損失の算定及び見掛の塑性粘度の影響

実吐出量と圧力損失の関係を図-16に示す。鉛直管と水平管の両者とも実吐出量の増加に伴い圧力損失も高くなる傾向を示した。2節の圧力損失は、鉛直管の場合3節より若干大きい、水平管の場合はテーパ管の使用

表-5 試験項目と方法

試験項目	試験方法	管理値	ポンプ圧入実験	
			荷卸	圧送後(天端)
スランプフロー(cm)	JIS A 1150	65.0±7.5	○	○
スランプフロー-50cm(秒)		(参考値)	○	○
スランプフロー-停止(秒)		(参考値)	○	○
空気量(%)	JIS A 1128	2.0±1.5	○	○
単位容積質量(kg/m ³)	JIS A 1116	(参考値)	○	○
コンクリート温度(°C)	JIS A 1156	5~35	○	○
塑性粘度(N・cm・min)	回転粘度計	25以下	○	-

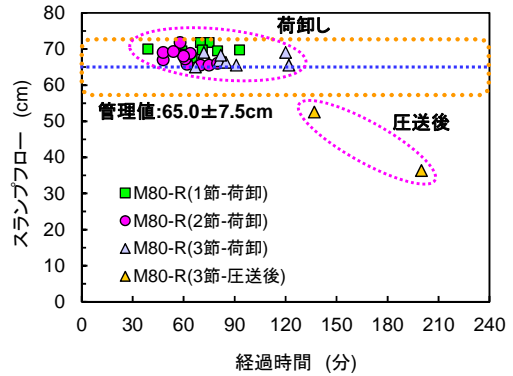


図-13 試料採取地点別スランプフロー

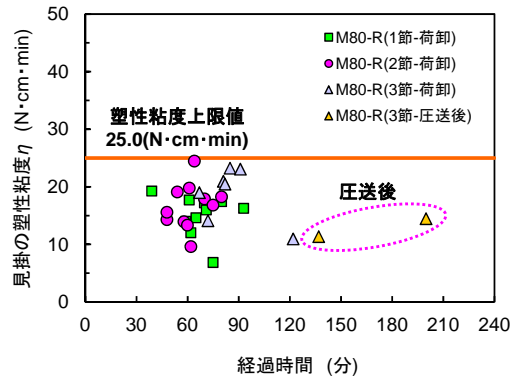


図-14 試料採取地点別見掛の塑性粘度

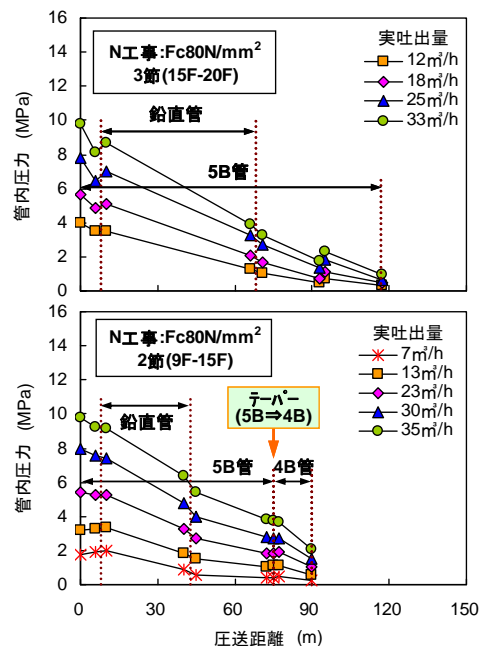


図-15 圧送距離による管内圧力の変化

により大きく増加する顕著な影響が見られた。見掛の塑性粘度が圧力損失に与える影響について、125A (5B) 管を使用した実吐出量 30m³/h における実測値と既往の圧力損失推定式との比較を図-17 に示す。見掛の塑性粘度が大きくなるほど圧力損失が高まる傾向であった。また、今回の結果に対し、既往の圧力損失の推定式は過大に評価していることが分かった。そこで、過去の見掛の塑性粘度データと今回実験から得られたデータを組み合わせ、見掛の塑性粘度による圧力損失の推定式を見直した。

5.3 見掛の塑性粘度による新たな圧力損失推定式

既往のデータに今回実験の結果を加えて解析した見掛の塑性粘度による圧力損失の新たな推定式を図-18 に示す。推定式は直線回帰により算出した。吐出量 30m³/h における見掛の塑性粘度による水平管と鉛直管の圧力損失の推定式を表-6 に示す。この式より求めた圧力損失の推定値を下記の式(1)¹⁵⁾に代入することで、ポンプ圧送負荷の推定値 P が算定できる。見掛の塑性粘度を把握することで、圧力損失を算定し圧入施工計画の立案に寄与できる見通しを得た。しかし、本推定式を施工計画時に用いるに当っては安全率の設定が必要であるが、この点については今後の検討課題である。

$$P=K_h(L_H+3B+2T+2F)+L_V(K_v)+\beta WHc \times 10^{-3} \cdots \cdots (1)$$

- ここに、 P ：ポンプ圧送負荷推定値(MPa)
- K_h ：水平管の圧力損失推定値(MPa/m)
- K_v ：鉛直管の圧力損失推定値(MPa/m)
- W ：フレッシュコンクリートの単位容積質量(kN/m³)
- L_H ：水平配管の距離(m)
- B ：ベント管の長さ(m)
- T ：テーパ管の長さ(m)
- F ：フレキシブルホースの長さ(m)
- L_V ：鉛直管の距離(m)
- β ：圧力の増大係数(1.0~1.3)
- Hc ：圧入高さ(m)

6. まとめ

高粘性の Fc80N/mm² 以上の中庸熟セメントを使用した高強度コンクリートについて、フレッシュ時の性状を把握するとともに、回転粘度計から得られる見掛の塑性粘度からポンプ圧送計画の立案に必要な圧力損失を推定する新たな式を提案した。また、これらの検討を通じ、高さ 86m までの CFT 造の圧入施工が可能であることを示したが、圧力損失の推定式を施工計画時に用いる際の安全率については、今後検討する予定である。

参考文献

1) 国土交通省国土技術政策総合研究所編；コンクリート充填鋼管(CFT) 造技術基準・同解説，(社)新都市ハウジング協会，2012.8

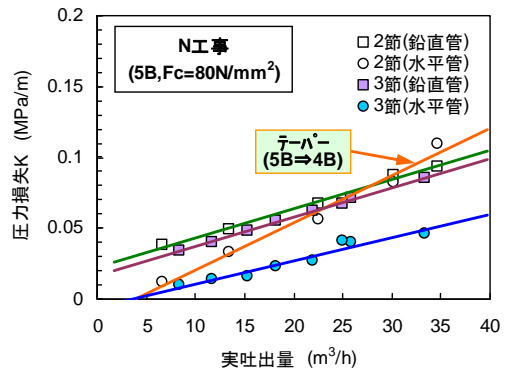


図-16 実吐出量と圧力損失の関係

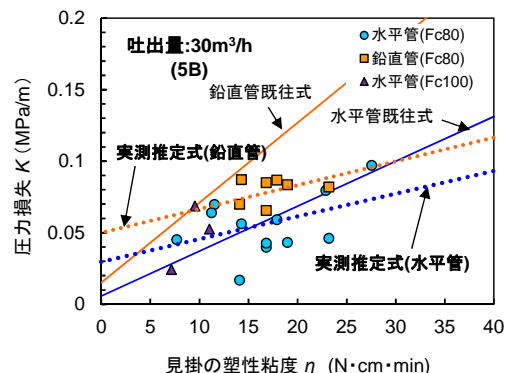


図-17 実測値と既往の圧力損失推定式との比較

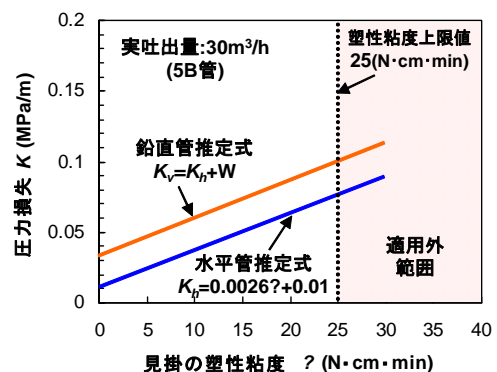


図-18 見掛の塑性粘度による新たな圧力損失推定式

表-6 見掛の塑性粘度による配管の圧力損失の推定式

吐出量(m ³ /h)	水平管推定式(K_h)	鉛直管推定式(K_v)
30	$0.0026\eta+0.01$ ($R^2=0.65$)	K_v+W

※ η : 見掛の塑性粘度(N·cm·min)

2) 依田和久ほか；コンクリート充填鋼管造用 Fc70~120N/mm² の充填コンクリートの開発，鹿島技術研究所年報，第 58 号，pp.87-92，2010

3) 吉岡伸明ほか；CFT 造超高層建築 施工実績-CFT コンクリート 14000m³，高さ 250m への挑戦-，コンクリート工学，Vol.41，No.1，pp.123-127，2003.1

4) 山崎順二ほか；フレッシュコンクリートの性状がポンプ圧送性に及ぼす影響について，GBRC，Vol.32，No.2，pp.17-28，2007.4

5) 日本建築学会；コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，日本建築学会，2009